

Research on Risk Assessment and Intelligent Monitoring Technology for Urban Gas Pipeline Leakage

Kai Cao Chai Bingyan

Yucheng China Resources Gas Co., Ltd., Dezhou, Shandong, 251200, China

Abstract

With the popularization of urban gas usage, the safe operation of gas pipelines is of vital importance. This article focuses on the risk assessment and intelligent monitoring technology of urban gas pipeline leakage. First, analyze the risk factors, including the material, corrosion and aging issues of the pipeline itself, construction damage, geological disasters and adverse weather conditions in the external environment, as well as violations and maintenance oversights in human operation. Further elaborate on the construction and application of evaluation models such as fault tree analysis, analytic hierarchy process, and fuzzy comprehensive evaluation. The research aims to provide a scientific basis for pipeline safety management. By integrating intelligent monitoring technology, it can enhance the efficiency of risk control and ensure the safety of urban gas supply.

Keywords

Urban gas pipeline Leakage risk assessment Intelligent monitoring technology

城镇燃气管道泄漏风险评估与智能化监测技术研究

曹凯 柴冰艳

禹城华润燃气有限公司, 中国 · 山东 德州 251200

摘要

随着城镇燃气使用的普及, 燃气管道的安全运行至关重要。本文聚焦城镇燃气管道泄漏风险评估与智能化监测技术。先分析风险因素, 含管道自身的材质、腐蚀、老化问题, 外部环境的施工破坏、地质灾害、恶劣气象影响, 以及人为操作中的违规与维护疏漏。再阐述故障树分析、层次分析法、模糊综合评价等评估模型的构建与应用。研究旨在为管道安全管理提供科学依据, 结合智能化监测技术, 可提升风险管控效率, 保障城镇燃气供应安全。

关键词

城镇燃气管道; 泄漏风险评估; 智能化监测技术

1 引言

城镇燃气管道是城市能源供应的重要脉络, 其安全运行关乎居民生活与公共安全。然而, 管道泄漏易引发火灾、爆炸等事故, 传统人工巡检等管理方式存在效率低、响应慢等局限。本文针对管道泄漏风险因素, 研究故障树分析等评估模型, 结合智能化监测技术, 为提升管道安全管理水平提供解决方案。

2 城镇燃气管道泄漏风险因素

2.1 管道自身因素

管道自身因素作为引发燃气泄漏的内在隐患, 其影响贯穿于管道全生命周期, 主要体现在管材质量、腐蚀程度和老化状况三个核心维度。管材质量若未能达到设计标准,

不仅会存在材质本身的固有缺陷, 还可能出现结构完整性不足的问题, 这会直接削弱管道承受内部燃气压力的能力, 在长期持续的压力作用下, 管道的薄弱部位会逐渐显现出结构损伤, 进而形成泄漏通道。管道内外腐蚀则是一种持续性的、渐进式的破坏过程, 燃气中含有的各类腐蚀性介质会对管道内壁产生化学侵蚀, 而土壤环境中的复杂成分, 包括不同的酸碱度、各类离子以及微生物群落, 会对管道外壁形成持续的腐蚀作用, 这种双重腐蚀会不断损耗管壁厚度, 使管道的结构强度逐步降低, 最终丧失原有的密封性能。此外, 随着使用时间的推移, 管道材质会不可避免地进入自然老化阶段, 其物理性能会发生显著变化, 表现为强度衰减、韧性降低, 同时接口处的密封材料也会因长期使用而出现性能退化, 失去原有的密封效果, 这些变化共同作用, 会持续提升泄漏发生的可能性, 尤其是那些超过设计使用年限仍在运行的管道, 此类问题的影响会更为显著。

2.2 外部环境因素

外部环境因素对燃气管道的安全运行构成显著威胁,

【作者简介】曹凯 (1992-), 男, 中国山东德州人, 本科, 工程师, 从事天然气研究。

主要包括第三方施工破坏、地质灾害影响和恶劣气象条件。在城市建设过程中，各类挖掘、钻孔等施工活动若缺乏对地下管道分布的精准掌握，很容易对管道造成机械性损伤，这种因施工操作不当引发的管道结构破坏，会直接破坏管道的完整性，进而导致燃气泄漏隐患。地质灾害的影响同样不容忽视，地震带来的强烈地面震动、滑坡产生的巨大外力挤压以及地面沉降引发的地基变形等，都会作用于燃气管道，使其在超出承受范围的外力作用下发生扭曲、断裂等结构性损坏。此外，强风、暴雨、暴雪等恶劣天气也会对管道安全形成挑战，强风可能对架空管道及附属设施产生冲击，暴雨可能导致地下管道被长时间浸泡并承受水流冲击，暴雪则会通过持续重压影响管道支架的稳定性，这些情况都可能间接破坏管道结构，引发泄漏事故。

2.3 人为操作因素

人为操作因素贯穿于燃气管道的安装、运维全流程，其风险主要源于违规操作和巡检维护不到位。在管道安装与检修过程中，操作人员若脱离操作规程的约束，任何一个环节的不规范行为都可能埋下泄漏隐患。比如接口处理时密封工艺的缺失、焊接作业中质量控制的松懈，或是在易燃易爆环境中使用不符合安全标准的工具，都会直接破坏管道系统的密封性与安全性。此外，用户在缺乏专业指导的情况下对管道及相关设备进行私自改动，也会打破原有系统的设计平衡，进一步放大泄漏风险。而巡检维护工作的疏漏则会使潜在隐患失去被及时发现和处理的机会，若未能按照既定的频次与标准开展巡检，或是在检查过程中对那些隐蔽性强的泄漏点、腐蚀点缺乏足够细致的排查，就会让这些隐患在管道

系统中持续存在并不断发展，最终演变为严重的泄漏事故。

3 城镇燃气管道泄漏风险评估模型构建

3.1 故障树分析模型

故障树分析模型以燃气管道泄漏这一核心后果作为顶事件，遵循“从结果追溯原因”的逆向逻辑，通过层层拆解的方式系统梳理导致泄漏发生的各类直接和间接因素，最终构建起由顶事件、中间事件和基本事件构成的多层级逻辑关系树。其核心价值在于清晰呈现各事件之间的因果链条与关联强度，例如在构建过程中，先将“管道自身故障”“外部环境破坏”“人为操作失误”等具有概括性的类别作为中间事件，再依据实际风险场景将这些中间事件进一步细化为更具体的基本事件——如管道自身故障可拆解为管材材质缺陷、管道腐蚀穿孔、接口密封失效等，外部环境破坏可细化为第三方施工机械损伤、地质沉降引发的管道变形等，且这些事件之间通过与门、或门等逻辑符号明确连接关系（与门表示多个事件同时发生才会导致上一级事件，或门表示任一事件发生即可引发上一级事件）。通过定性分析环节，可运用布尔代数运算对故障树进行化简，精准找出能够导致顶事件发生的所有最小割集，这些最小割集代表了引发泄漏的最低限度风险组合，有助于识别出需要重点防控的关键风险链条；而定量分析则在定性分析基础上，结合历史数据或专家评估确定各基本事件的发生概率，再依据逻辑门的运算规则逐级计算中间事件及顶事件的发生概率，同时通过结构重要度、概率重要度等指标量化各基本事件对顶事件的影响程度，从而为制定针对性的风险管控策略提供精准的优先级排序和科学依据。

表 1 故障树分析模型相关数据表格

事件类型	事件名称	发生概率（次/年）	结构重要度	概率重要度
基本事件	管材材质缺陷	0.002	0.15	0.12
基本事件	管道腐蚀穿孔	0.008	0.20	0.18
基本事件	接口密封失效	0.005	0.18	0.15
基本事件	第三方施工机械损伤	0.010	0.22	0.20
基本事件	地质沉降引发管道变形	0.003	0.10	0.08
基本事件	违规操作	0.006	0.16	0.14
基本事件	巡检维护不到位	0.007	0.19	0.16

3.2 层次分析法模型

层次分析法模型通过搭建清晰的多层级评价体系，将复杂的燃气管道泄漏风险评估问题系统化、结构化，从而实现风险的精准量化。其核心流程始于层级框架的构建：首先明确“燃气管道泄漏风险评估”为顶层目标，作为整个分析的核心导向；中间层设定为准则层，涵盖管道自身因素（如管材质量、腐蚀、老化等）、外部环境因素（如第三方施工、地质灾害、气象条件等）、人为操作因素（如违规操作、巡检疏漏等），这些是影响泄漏风险的主要类别；最底层为指标层，是准则层的进一步细化，例如将管道自身因素拆解为

具体的管材缺陷、内壁腐蚀速率、接口密封状况等可直接评估的风险点。

在确定层级结构后，通过专家咨询与行业经验判断，对同一层级内的元素相对于上一层级某一目标的重要性进行两两对比。这种对比采用标准化的标度体系（如 1-9 标度法），将定性的重要性描述转化为定量数值，进而构建判断矩阵——矩阵中的每个元素均代表某一元素相对于另一元素的重要程度比值。为确保判断逻辑的一致性，需对矩阵进行严格的一致性检验，通过计算一致性指标（CI）与随机一致性指标（RI）的比值（CR），当 CR 小于 0.1 时，判定矩

阵具有满意的一致性，否则需重新调整专家判断结果。在通过一致性检验后，采用特征根法等数学方法计算各层级元素的权重向量，即每个元素在所属层级中的相对重要性占比。随后通过层级间的加权聚合，从指标层到准则层逐步向上计算，最终得到各具体风险因素相对于顶层目标的综合权重。这些权重值直观反映了不同风险因素对燃气管道泄漏风险的贡献程度，例如若“第三方施工破坏”的综合权重显著高于其他因素，则表明其是需要优先管控的关键风险点，为制定差异化的风险防控策略提供了明确的优先级依据。

3.3 模糊综合评价模型

模糊综合评价模型专为应对燃气管道泄漏风险中大量存在的不确定性和模糊性而设计，其核心在于通过隶属度函数将难以精确量化的定性指标（如“腐蚀程度较高”“施工影响较大”等）转化为可计算的定量数据，从而实现对复杂风险场景的系统评估。

该模型的应用流程始于评价体系的搭建：首先明确评价因素集，即梳理出所有可能影响管道泄漏的关键风险因素，涵盖管道自身的管材性能、腐蚀状况、老化程度，外部环境的地质稳定性、气象影响，以及人为操作中的规范程度、维护质量等；同时设定风险等级集，通常按风险严重程度划分为若干层级，如“极低风险”“低风险”“中等风险”“高风险”“极高风险”，并为每个等级赋予相应的语义描述和参考阈值。接下来，通过专家经验判断、现场调研数据统计或历史案例分析等方式，构建隶属度矩阵。矩阵中的每个元素代表某一评价因素隶属于某一风险等级的程度，取值范围在0到1之间，且每个因素对所有等级的隶属度之和为1。例如，对于“管道腐蚀”这一因素，经分析可能得出其隶属于“低风险”的程度为0.2、“中等风险”为0.5、“高风险”为0.3，直观反映该因素在不同风险等级中的分布状态。在获取层次分析法计算出的各评价因素权重（即各因素对整

体风险的影响程度）后，将权重向量与隶属度矩阵进行模糊合成运算（常用加权平均法或取大取小法），得到综合评价结果向量。该向量中的元素对应整体风险隶属于各等级的程度，随后通过最大隶属度原则（选取隶属度最高的等级作为评估结果）或综合评价值计算（将结果向量与等级量化值加权求和），最终确定燃气管道泄漏的整体风险等级。

表2 模糊综合评价模型相关数据表格

评价因素	低风险	中等风险	高风险
管道腐蚀	0.2	0.5	0.3
管材性能	0.4	0.2	0.1
老化程度	0.1	0.3	0.4
地质稳定性	0.3	0.3	0.1
气象影响	0.3	0.2	0.1
操作规范程度	0.2	0.4	0.2
维护质量	0.2	0.3	0.2

4 结语

城镇燃气管道泄漏风险评估意义重大。本文剖析了管道自身、外部环境及人为操作三类风险因素，构建的故障树分析、层次分析法、模糊综合评价模型，为风险量化与管控提供有效工具。这些研究能提升管道安全管理精准度，减少泄漏事故。未来需深化模型与智能化监测技术融合，实现风险动态预警，为城镇燃气安全供应筑牢防线，保障居民生活与城市发展。

参考文献

- [1] 田云祥,冯章柯,谢明碧.城镇燃气管道泄漏智能化分级管理[J]. 煤气与热力,2024,44(12):30-32.
- [2] 郝帅,孙婷婷.试论城镇燃气管道安全运行智能化监测系统[J]. 当代化工研究,2022,(09):99-101.
- [3] 胡哲辉,唐鹰翔,朱神平.城镇中低压钢质燃气管道腐蚀泄漏风险评估[J]. 煤气与热力,2021,41(04):93-96+103.